

Licht und Materie Übung II.3

Übungstermine: Gruppe 1 Di 21.05.19 (Raum 2.346), Gruppe 2 Do 23.05.19 (Raum 2.558)

Hinweise: Jedes Übungsblatt besteht aus zwei regulären (gekennzeichnet mit einem *B*) und einer anspruchsvolleren *M*-Aufgabe. Die Aufgabenteile (a), (b), ... sind entsprechend ihrer Schwierigkeit mit Punkten gewichtet. Zur Erlangung des Scheins benötigen Bachelor- und Lehramtsstudenten 50% der gesamten Punktzahl (kombiniert aus *B*- und *M*-Aufgaben). M.Sc.-Studenten benötigen 50% der gesamten Punktzahl und zusätzlich 50% der Punktzahl aller *M*-Aufgaben. Es muss zweimal an der Tafel vorgerechnet werden.

Aufgabe 1 (B, 30 P)

In Abbildung 1 sehen Sie das Transmissionsspektrum einer etwa 0.8 mm dicken Scheibe aus dotiertem Silicium als Funktion der Frequenz und Temperatur. Maßgeblich für den Verlauf des Spektrums sind die Dotierelektronen, die sich metallisch verhalten.

- (15 P) Erklären Sie den generellen Verlauf des Spektrums im Rahmen des Drude Modells (Vernachlässigen Sie die Oszillationen mit der Frequenz).
- (15 P) Überlegen Sie sich, wie sich die Materialeigenschaften hier als Funktion der Temperatur und Frequenz verhalten. Skizzieren Sie den prinzipiellen Verlauf für die Streurrate $\Gamma(T)$, die Ladungsträgerdichte $N(T)$, die Gleichstromleitfähigkeit $\sigma_0(T)$ und die optische Leitfähigkeit $\sigma_1(T)$ für $T = 2, 100, 150$ und 300 K.

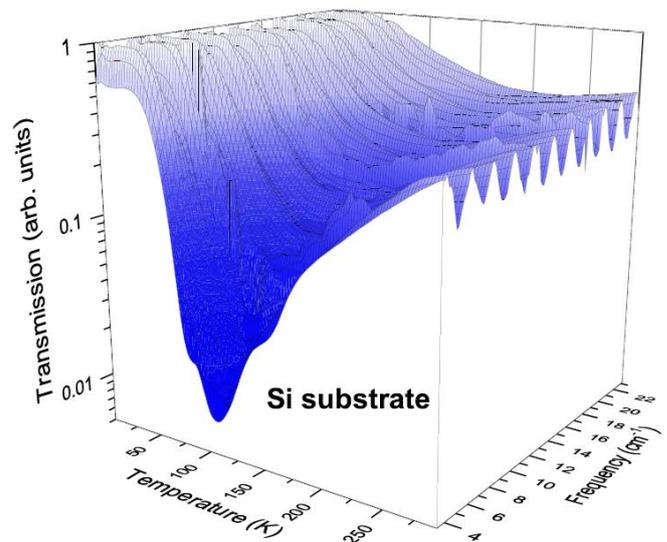


Abbildung 1 Transmissionsspektrum einer Si-Scheibe als Funktion der Frequenz und Temperatur. Aus Phys Rev. B. 86, 184503 (2012).

Aufgabe 2 (B, 20 P)

Um Halbleiter effektiv mit dem Drude-Modell beschreiben zu können, kann man die effektive dielektrische Konstante mit dem Realteil $\epsilon_{1,\text{eff}}$ und dem Imaginärteil $\epsilon_{2,\text{eff}}$ heranziehen

$$\epsilon_{1,\text{eff}} = \epsilon' \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \frac{1}{\tau^2}} \right]$$

$$\epsilon_{2,\text{eff}} = \epsilon' \frac{\omega_p^2}{\omega\tau \left(\omega^2 + \frac{1}{\tau^2} \right)},$$

mit $\omega_p^2 = \frac{ne^2}{m\epsilon'}$ der Plasmafrequenz und ϵ' der Hintergrund-Dielektrizitätskonstante des Halbleiters (hervorgerufen durch das Atomgitter).

- (5 P) Betrachtet wird ein eigenleitender Germanium-Halbleiter bei Zimmertemperatur, dessen Elektronenkonzentration $n = 2.5 \cdot 10^{19} \text{m}^{-3}$ beträgt. Seine Hintergrund-Dielektrizitätskonstante beträgt $\epsilon' = 15.3 \epsilon_0$, die Relaxationszeit für Elektronen und Löcher $\tau = 2.0 \cdot 10^{-12} \text{s}$.
Welchen Einfluss haben freie Ladungsträger auf die dielektrische Konstante? Wie unterscheidet sich die

effektive Dielektrizitätskonstante von der statischen Dielektrizitätskonstante? Zeichnen Sie hierfür schematisch $\varepsilon_{1,eff}/\varepsilon'$ als Funktion der Frequenz.

- b) (15 P) Warum tragen beim Halbleiter nicht nur Elektronen zum Ladungstransport bei? Wie kann es sein, dass Elektronen und Löcher unterschiedliche effektive Massen besitzen?

Der hier betrachtete Germanium-Halbleiter besitzt eine effektive Elektronenmasse von $m_{e,eff} = 0.55m_0$ und eine effektive Löchermasse von $m_{h,eff} = 0.37m_0$. Berechnen Sie den Brechungsindex und die Eindringtiefe bei den Frequenzen $1 \cdot 10^{14}$ Hz und $1 \cdot 10^{10}$ Hz. Hinweis: Addieren Sie Beiträge von Elektronen und Löchern zur dielektrischen Konstante. Es gilt $\hat{\varepsilon}_{eff}/\varepsilon_0 = (n + i\kappa)^2$, mit κ dem Extinktionskoeffizienten.

Aufgabe 3 (M, 20 P)

Abbildung 2 zeigt Transmission und Reflexion eines Indiumzinnoxid (ITO) Films (auf einem Glas-Substrat). Betrachten Sie den prinzipiellen Verlauf der Spektren und erklären Sie sie mit den Materialeigenschaften von ITO.

- a) (10 P) Warum ändert sich die Transmission drastisch bei ca. 7000 cm^{-1} ? Was passiert oberhalb von 30000 cm^{-1} ? Erklären sie die Oszillationen im transparenten Bereich und schätzen Sie die Dicke der Probe ab.
- b) (10 P) Wie groß ist die Ladungsträgerdichte des hier vorliegenden ITO? Warum ergibt die Summe aus Reflexion und Transmission nicht eins? In welchen Frequenzbereichen ist diese Abweichung besonders ausgeprägt und warum? Geben Sie eine obere Abschätzung an für die Drude-Relaxationsrate der freien Ladungsträger.

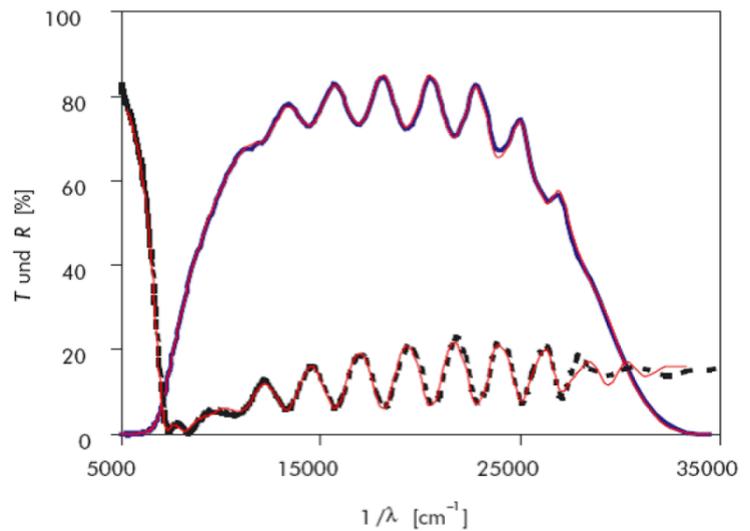


Abbildung 2 Transmission und Reflexion eines ITO films. Aus Vakuum in Forschung und Praxis 18, 15 (2006)

Zusatzfragen

- Können Metalle transparent sein?
- „ ω_p hängt von der Ladungsträgerdichte ab.“ Wie kann man sich das anschaulich erklären, wo doch alle Elektronen „separat“ mit dem E-Feld wechselwirken? Wieso ist der Gesamteffekt keine reine Superposition?
- Elektronen streuen nicht an Atomen des Metallgitters. Warum stellt der interatomare Abstand eine untere Grenze für die freie Weglänge dar?
- Durch welche Faktoren wird die Genauigkeit der Messung der Reflexion eines Metalls beeinflusst und warum ist die Umsetzung der Messung nahezu unmöglich?